

# VIZSGÁLATOK AZ ESZTÉTIKUSABB, KÖNNYEDEBB SZERKEZETEK ÉRDEKÉBEN -

EN 1993-1-5 szabvány lemezhorpadási ellenállásának megbízhatósági analízise

**Hornyák Tamás** / okleveles építőmérnök

**Dr. Somodi Balázs** / tudományos munkatárs, BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

**Dr. Kövesdi Balázs** / egyetemi docens, BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

## Bevezetés

Manapság a tervezők gazdaságosabb és esztétikusabb szerkezetek megalkotására törekednek, amelyet gyakran új technológiák alkalmazásával érnek el. Acélszerkezetek esetében a nagyszilárdságú alapanyagok (HSS – High Strength Steel) felhasználásával jóval karcsúbb és könnyebb szerkezetek tervezhetők, azonban ezek általában stabilitásvesztésre érzékenyebbek. Jelen cikkben a tiszta nyomással terhelt, hegesztett négyszög zártszelvények numerikus modellen alapuló lokális horpadásvizsgálatát mutatjuk be. A lemezelemek lokális horpadáshoz tartozó csökkentő tényezőjét ( $\rho$ ) az úgynevezett Winter-görbe segítségével lehet meghatározni. Korábbi kutatási eredmények alapján a görbe a kísérleti eredmények átlagát reprezentálja csuklósan megtámasztott tisztán nyomott lemezek esetén, és nem a teherbírás karakterisztikus értékét, ezért a szabvány által előírt biztonság nem teljesül mindig. A jelenleg hatályos parciális biztonsági tényező értéke a 4. keresztmetszeti osztályú acélszelvények horpadási ellenállásának meghatározásához  $\gamma_{M0}=1,0$ , amely ezen eredmények tükrében módosításra szorul. A kutatás célja a lokális horpadáshoz tartozó, megfelelő biztonsági szintet biztosító parciális biztonsági tényező ( $\gamma_M$ ) meghatározása, melyhez determinisztikus és sztochasztikus számításokat végeztünk.

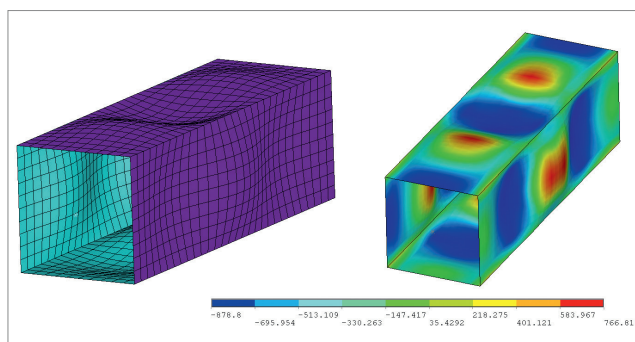
## Numerikus modell

A hegesztett zártszelvények horpadási teherbírásának meghatározásához négyszög héjelemekből álló numerikus modellt fejlesztettünk ANSYS 16.2 végelelemes programban (1. kép). A teherbírást geometriai és anyagi nem-linearitást figyelembe vevő analízis segítségével határoztuk meg, a kezdeti lokális geometriai imperfekció és hegesztési sajátfeszültségek figyelembevételével (GMNIA: Geometrically and Materially Nonlinear Analysis with Imperfections). A modell verifikációját Schillo és társai laboratóriumi kísérletei alapján [2] hajtottuk végre. A kutatás az RWTH Aachen Egyetemen elvégzett kísérletsorozat eredményeit és következtetéseit veszi alapul, amelyek szintén igazolták, hogy

a szabványos biztonsági tényező értékét növelni szükséges a megfelelő biztonság eléréséhez [3].

A numerikus vizsgálatok során különböző anyagmodelleket alkalmaztunk a normál- és nagyszilárdságú acélok esetében. Normálszilárdságú acélokra lineárisan rugalmas - képlékeny, felkeményedő anyagmodellt vettünk fel von Mises folyási és kinematikus keményedési feltételekkel. Nagyszilárdságú acél esetében Ramberg-Osgood anyagmodellt használtuk  $n=14$  paraméter alkalmazásával az (1) képlet alapján:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \cdot \left( \frac{\sigma}{f_y} \right)^n \quad (1)$$



**1. kép:** A geometriai imperfekció (bal) és a tönkremeneteli állapot (jobb)

A nyomó sajátfeszültség értékét Somodi és Kövesdi [4] ajánlása alapján a (2)-(3) összefüggések szerint határoztuk meg, a húzó sajátfeszültséget pedig a folyáshatár értékére vettük fel. A cikkben javasolt feszültségeloszlás helyett egy egyszerűsített modellt alkalmaztunk (2. kép).

$$t \leq 5 \text{ mm}: \sigma_{rc} = 70 - 21t + t^2 - (2900 - 3600 \cdot (t - 5)) \cdot \left( \frac{b}{t} \right)^{-1} \quad (2)$$

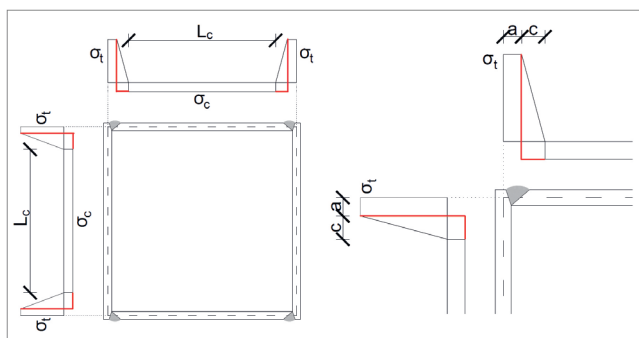
$$t \geq 5 \text{ mm}: \sigma_{rc} = 70 - 21t + t^2 - (2900 - 290 \cdot (t - 5)) \cdot \left( \frac{b}{t} \right)^{-1} \quad (3)$$

A lokális geometriai imperfekció meghatározására 2017 júliusában méréseket végeztünk a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék Szerkezetvizsgáló Laboratóriumában. A vizsgálatokat egy mozgó indukzív jelátalakítóval felszerelt speciális berendezéssel

hajtottuk végre. A 6 db rendelkezésünkre álló hegesztett zártszelvényen elvégzett 288 db mérés kiértékelése alapján a (4)-(5) összefüggést alkalmaztuk az amplitúdó lemezszélességre fajlagosított értékének meghatározására ( $e/b$ ). Az imperfekció alakját (három fél-színusz hullám, lásd 1. kép) az első kihajlási alak szerint vettük fel.

$$b/t \leq 35: e/b = \frac{-0.0513 \cdot \frac{b}{t} + 2.6131}{1000} \quad (4)$$

$$b/t \geq 35: e/b = \frac{0.8176}{1000} \quad (5)$$



**2. kép:** A sajátfeszültségek eloszlásánál alkalmazott közelítések

### Determinisztikus számítások

A determinisztikus numerikus vizsgálatok során többféle anyagminőséggel (S235, S355, S500, S700 és S960) végeztük el a számításokat, több lemezvastagságot (4-8-12-16 mm) is megvizsgálva. Tiszta nyomásnál a csökkentő tényező ( $\rho$ ) meghatározása a numerikus modellből kapott teherbírások ( $N_{FEM}$ ), a névleges geometriai méretek ( $A_{nom}$ ), a lemezvastagság ( $t$ ) és a névleges anyagi jellemzők ( $f_y$ ) alapján történt az alábbi módon (6).

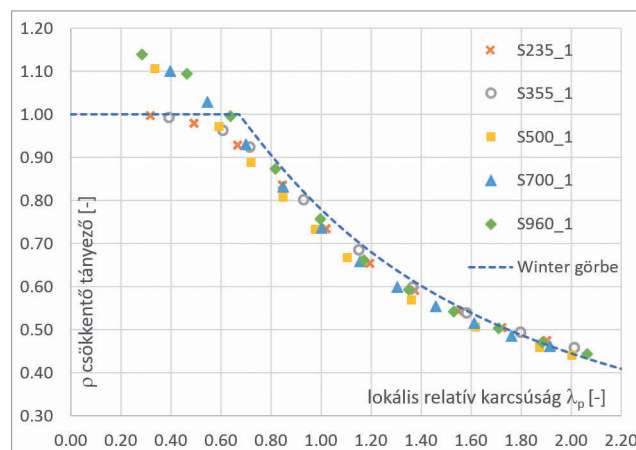
$$\rho = \frac{\frac{N_{FEM}}{f_y} - 4t^2}{A_{nom} - 4t^2} \quad (6)$$

Először a  $\rho$  csökkentő tényezőt az EN 1993-1-5 szerinti  $b/200$ -as ekvivalens geometriai imperfekcióval és sajátfeszültségek alkalmazása nélkül határoztuk meg (3. kép). Látható, hogy a szabványosított Winter-görbe közel ezzel az imperfekcióval lett kalibrálva tiszta nyomás esetén. Zömök zártszelvényeknél ( $\lambda_p < 0.673$ ) a normál- és nagyszilárdságú anyagmodellek közötti különbségek miatt jelentkeznek az eltérések.

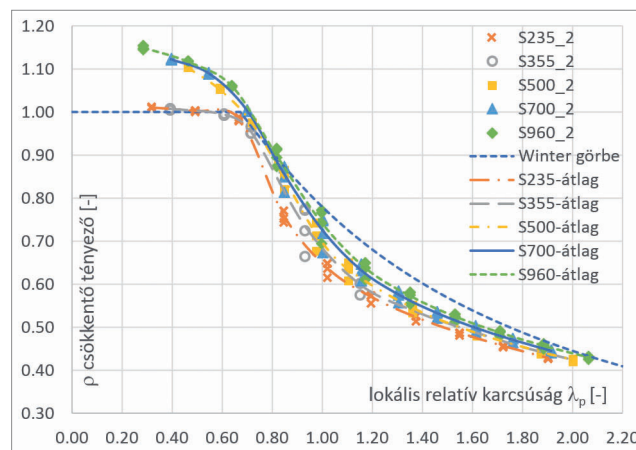
A második esetben elvégeztük a számításokat a 2. pontban bemutatott sajátfeszültséggel és imperfekcióval is (4. kép). A sajátfeszültségek hatása miatt adott karcsúságon belül megjelentek a szórások a különböző lemezvastagságok között. Megfigyelhető, hogy

a lemezvastagság növelésével arányaiban fokozatosan nő a csökkentő tényező értéke: egy karcsúságon belül szereplő azonos színű pontok alulról felfelé a 4-8-12-16 mm-es esetekhez tartozó értékeket jelentik. Jól látható az is, hogy a sajátfeszültségeknek a  $\sim 0,8 \div 1,2$  karcsúsági tartományban van a legnagyobb hatása; a két átlaggörbe (S355 és S960) ekkor tér el egymástól a legjobban.

Az eredmények alapján azt a következtetést lehet levonni, hogy a Winter-görbe a hegesztett négyzetes zártszelvények esetén nincs minden esetben a biztonság oldalán. Ennek megfelelően vagy a görbe, vagy a vele egyidejűleg a horpadási ellenállás meghatározásához alkalmazott parciális tényező módosításra szorul. Utóbbi meghatározására végeztük el a sztochasztikus számításokat, amelyeket a következő fejezetben mutatunk be.



**3. kép:** Az első determinisztikus számítás eredményei



**4. kép:** A második determinisztikus számítás eredményei

### Sztochasztikus számítások

A sztochasztikus numerikus analízis alap gondolata az, hogy virtuálisan hozunk létre számos próbatestet, amelyeken numerikus szimuláció segítségével különböző vizsgálatok végezhetők el a költséges laboratóriumi

kísérletek helyett. A geometriai és anyagi paraméterek, valamint az anyagi és geometriai imperfekciók valós eloszlásának figyelembevételével előállított próbatestek horpadási ellenállása a numerikus végeselemes modell segítségével határozható meg. Ezután az eredmények statisztikailag kiértékelhetők, karakterisztikus (5%-os kvantilis) és tervezési (1%-os kvantilis) teherbírási meghatározhatók. A vizsgálat során számos Monte Carlo szimulációt hajtottunk végre hegesztett négyszög zártszelvényekre, úgynevezett válaszfelület módszer segítségével. A számításokat S355 és S960 acél anyagminőségekkel végeztük el. A  $0,6 \div 1,6$  közötti karcsúsági tartományt vizsgáltuk, mivel az építőmérnöki gyakorlatban ebbe a tartományba esnek a leggyakrabban alkalmazott szerkezeti elemek. A vizsgált lemezvastagságok: 5-8-12-16-20-30 mm. Minden geometria esetén három különböző esetet tanulmányoztunk. Első lépésben a JCSS (Joint Committee on Structural Safety) által javasolt relatív szórás alkalmaztuk a lemezvastagságra vonatkozóan, majd a második és harmadik esetben már alsó és alsó-felső gyártási toleranciaszinteket is figyelembe vettünk a lemezvastagság esetén, mivel ezeket külön szabályozzák a gyártók.

### Alkalmazott valószínűségi változók

#### Geometriai jellemzők

Valószínűségi változónak a lemezszélességet ( $b$ ) és a lemezvastagságot ( $t$ ) vettük fel. A JCSS szerint a geometriai paraméterek normál eloszlást követnek, valamint a vastagság relatív szórása  $v_t = 0,05$ , míg a szélességé  $v_b = 0,005$ . A várható értékek ( $t_{mean}$ ) megegyeznek a névleges értékekkel ( $t_{nom}$ ). Ezeket a javaslatokat alkalmaztuk az első vizsgálat során. A második esetben konstans relatív lemezvastagság-szórás helyett a vastagság várható értékétől ( $t_{mean}$ ) függő szórásmodellt alkalmaztunk Schillo és társai alapján ((7) összefüggés, [5]). Az alsó („B” osztályú) gyártási toleranciát is tartalmazó modellel eliminálhatók azok a vastagság értékek,

amelyek a szabványok előírásai miatt elvileg elő sem fordulhatnak.

$$v_t = \min \left( 0,05; 0,3 \cdot \frac{1}{t_{mean}} \cdot \frac{1}{3} \right) \quad (7)$$

A harmadik lépésben már a felső gyártási mérettűréseket is figyelembe vettük. Mivel „B” osztály esetén az alsó gyártási mérettűrések konstansok, a felsők viszont függenek a lemezvastagságtól, ezért a várható értékek nem egyeznek meg a névleges értékekkel (1. táblázat). Ezek a megfontolások később a kiértékelések során is fontos szerepet játszottak.

#### Anyagjellemzők

A rugalmassági modulust ( $E$ ) determinisztikus paraméterként kezeltük. A folyáshatárt valószínűségi változóként definiáltuk lognormál eloszlással, de konstans szórás helyett anyagminőségtől függő szórással a 2. táblázat szerint.

Névleges acélminőség	Relatív szórás ( $v_{fy}$ )	$f_y/f_{y,mean}$
$f_y \leq 300$	0.070	0.8892
$300 < f_y \leq 450$	0.055	0.9122
$450 < f_y \leq 600$	0.045	0.9278
$f_y > 600$	0.033	0.9467

**2. táblázat:** Az anyagminőség relatív szórása

#### Anyagi és geometriai imperfekció

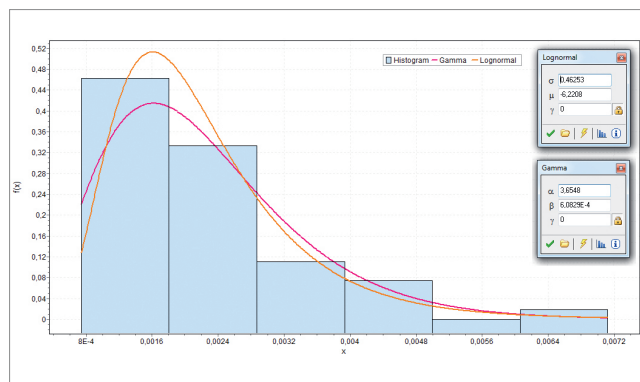
A sztochasztikus számításoknál csak a nyomó sajátfeszültséget ( $\sigma_c$ ) alkalmaztuk független valószínűségi változóként, amelynek várható értéke megegyezik a 2.2 pontban leírtakkal és relatív szórása  $v_{rc} = 0,17$ .

A lokális geometriai imperfekció lemezszélességre fajlagosított értékét tekintettük valószínűségi változónak.

Névleges vastagság ( $t_{nom}$ )	Gyártási tolerancia "B" osztály esetén		Várható érték ( $t_{mean}$ )	Relatív szórás ( $v_t$ )
	alsó	felső		
$3 \leq t < 5$	-0.3	+0.9	$t_{nom} + 0.30$	$0.60 \cdot \frac{1}{t_{mean}} \cdot \frac{1}{3}$
$5 \leq t < 8$	-0.3	+1.2	$t_{nom} + 0.45$	$0.75 \cdot \frac{1}{t_{mean}} \cdot \frac{1}{3}$
$8 \leq t < 15$	-0.3	+1.4	$t_{nom} + 0.55$	$0.85 \cdot \frac{1}{t_{mean}} \cdot \frac{1}{3}$
$15 \leq t < 25$	-0.3	+1.6	$t_{nom} + 0.65$	$0.95 \cdot \frac{1}{t_{mean}} \cdot \frac{1}{3}$
$25 \leq t < 40$	-0.3	+1.9	$t_{nom} + 0.80$	$1.10 \cdot \frac{1}{t_{mean}} \cdot \frac{1}{3}$

**1. táblázat:** A harmadik típusú szórásmodell

Az imperfekció sztochasztikus paramétereinek felvételéhez a saját kísérleteinken kívül felhasználtuk az Aacheni Egyetemen végrehajtott kísérletek eredményeit is. Az adathalmazra különböző eloszlásokat illesztettünk, végül a lognormál eloszlás közelítette legjobban a mérési eredményeket,  $v_i=0,48841$  relatív szórásértékkel és az 5. képen látható  $\mu$  és  $\sigma$  paraméterekkel.



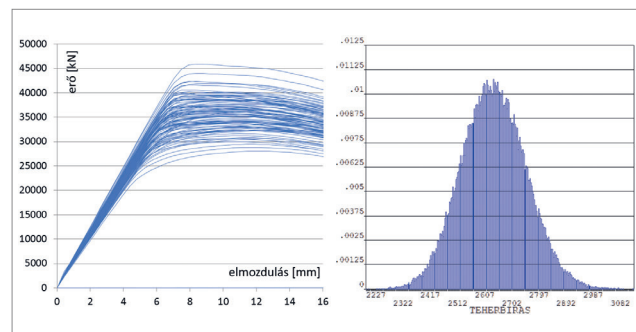
5. kép: A lokális geometriai imperfekció sűrűségfüggvénye

### A sztochasztikus analízis menete

Az előzőekben bemutatott valószínűségi változókkal végeztük el a sztochasztikus vizsgálatokat az ANSYS PDS moduljának segítségével (PDS: Probabilistic Design System). Első lépésben Monte Carlo szimulációt hajtottunk végre latin hiperkocka mintavételezési eljárás alkalmazásával. Ezután úgynevezett válaszfelület módszerrel határoztuk meg a teherbírást leíró regressziós függvényt, amelyen egy második Monte Carlo szimulációt végeztünk el. A GMNI analízist Monte Carlo szimulációval kombináló vizsgálati módszerek még viszonylag újszerűnek számítanak manapság. A válaszfelület módszer lényege, hogy az első Monte Carlo szimulációval kapott eredményekre regressziós felületet illeszt a program, amely megadja a teherbírást meghatározásához szükséges approximációs függvényt. A függvény birtokában már nem szükséges tényleges nemlineáris szimulációkat végezni, elegendő az újabb Monte Carlo szimulációval legenerált bemeneti paramétereket a függvénybe behelyettesíteni. A szimulációk után rendelkezésünkre álltak az erő-elmozdulás diagramok, amelyekben viszonylag nagy szórások voltak tapasztalhatók, valamint az eredmények hisztogramja is, amely közel normál eloszlást követett (6. kép). A hisztogram előállítás után meghatározhatók voltak az átlag, karakterisztikus (5%-os kvantilis) és tervezési (1%-os kvantilis) teherbírás értékek, amelyekből számítható volt a csökkentő tényező értéke (3.1 fejezet (6) összefüggés

szerint). Végül a szabványos és tervezési csökkentő tényezők hányadosa adja a szükséges parciális biztonsági tényezőt (8):

$$\gamma_{M^*} = \frac{\rho_{Winter}}{\rho_{1\%}} \quad (8)$$

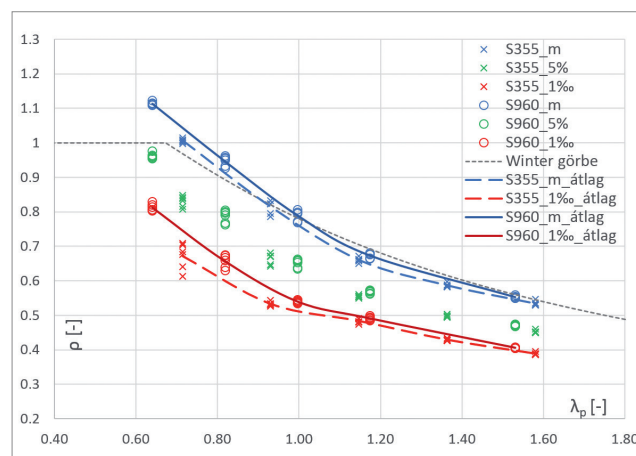


6. kép: A kísérletek erő-elmozdulás diagramja és hisztogramja

### Eredmények

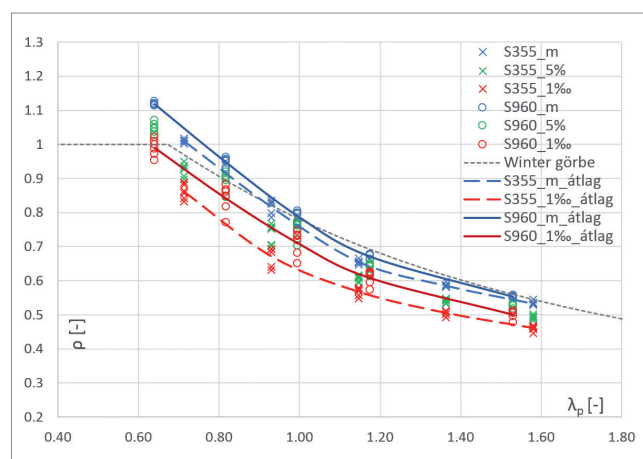
A következőkben a sztochasztikus számítások eredményei kerülnek bemutatásra. A 4.2.1. fejezetben bemutatott három különböző szórásmodellt figyelembe véve a 7., 8. és 9. képek reprezentálják a meghatározott numerikus teherbírást. A három bemutatott diagramok átláthatóságának megkönnyítése érdekében különböző színeket és jelöléseket használunk:

- a kék, zöld és piros pontok minden esetben az átlag, 5%-os (karakterisztikus) és 1%-os (tervezési) teherbírást jelentik,
- az „x” jelölők mindig az S355, az „o” jelölők mindig az S960 eredményekre vonatkoznak,
- a különböző lemezvastagságokat az egyes karcsúsági értékekhez és színekhez tartozó pontok szórása reprezentálja, mely pont-csoportosulások átlagértékére görbét illesztettünk (az 5%-os eredmények kivételével). S355-hez tartozik a halványabb árnyalatú görbe, S960-hoz pedig a sötétebb görbe.

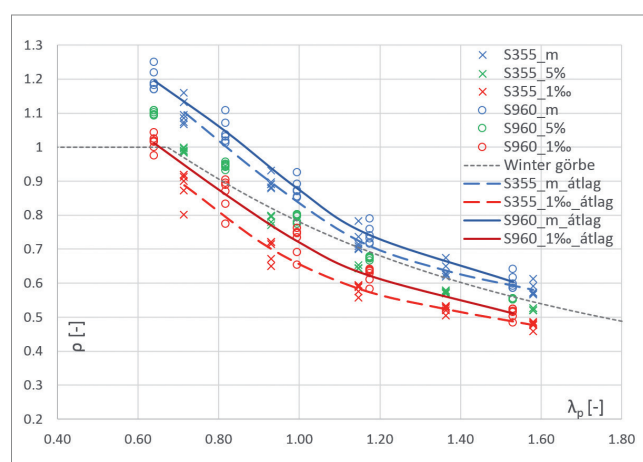


7. kép: Első szórásmodell eredményei





8. kép: Második szórásmodell eredményei



9. kép: Harmadik szórásmodell eredményei

Megállapítható, hogy a lemezvastagságra alkalmazott szórásmodell jelentős hatással bír a figyelembe veendő csökkentő tényezőre. Az első és a második szórásmodell közelítőleg ugyanazokat az átlagos teherbírásokat eredményezi, de a karakterisztikus és főleg a tervezési értékek a második modell esetén már jóval magasabbak. A második és a harmadik szórásmodellt összehasonlítva megállapítható, hogy azok közelítőleg azonos tervezési teherbírásokat eredményeznek, de a karakterisztikus és főként az átlag értékek jóval magasabbak a harmadik, legfejlettebb szórásmodell esetén.

Az összesített végeredményeket a 3. táblázat tartalmazza. Látható, hogy a pontosított szórásmodellek figyelembevételével milyen mértékben csökken a biztonsági tényező értéke. Végző konklúzióként elmondható, hogy az anyagminőségektől függetlenül esetben átlagosan  $\gamma_{M^*} = 1,11$  érhető el egy fejlettebb, a valósághoz közelebb álló lemezvastagság-szórásmodell alkalmazásával. Ez S960-as anyagminőségig akár  $\gamma_{M^*} = 1,07$  értékig csökkenthető.

			$\gamma_{M^*}$ szórásmodellek szerint		
Acél	b/t	$\lambda_p$	Első	Második	Harmadik
S355	35	0.714	1.44	1.13	1.09
	45	0.930	1.54	1.22	1.17
	55	1.147	1.46	1.24	1.21
	65	1.363	1.44	1.22	1.17
	75	1.580	1.40	1.18	1.14
	Átlag		1.46	1.20	1.16
S960	20	0.641	1.26	1.04	1.01
	25	0.818	1.36	1.06	1.04
	30	0.996	1.45	1.10	1.08
	35	1.174	1.41	1.14	1.11
	45	1.530	1.38	1.12	1.10
	Átlag		1.37	1.09	1.07
S355-S960 átlag			1.41	1.14	1.11

3. táblázat: Összesített végeredmények

## Összefoglalás

A kutatás során az alább felsorolt következtetéseket vontuk le tiszta nyomással terhelt hegesztett zártszelvények lokális horpadása esetén:

- A szabványosított Winter-görbe b/200-as ekvivalens geometriai imperfekció alkalmazása esetén reprodukálható numerikus modell alkalmazásával.
- Az anyag szilárdsági jellemzőinek közvetett hatása a csökkentő tényezőben a sajátfeszültségek figyelembevételén keresztül jelentkezik. Nagyszilárdságú acélok esetén a kedvezőbb sajátfeszültségi eloszlások miatt fajlagosan nagyobb a lokális horpadással szembeni ellenállás, mint alacsony szilárdságú acélok esetén.
- A sajátfeszültségek jelentős hatása a  $\sim 0,8 \div 1,2$  karcsúsági tartományban jelentkezik.
- A lemezvastagság növelésével fajlagosan nagyobb lokális horpadási ellenállás érhető el.
- A jelenlegi ismereteink szerint legfejlettebb (harmadik) lemezvastagság-szórásmodellel az alábbi parciális biztonsági tényezők alkalmazása lenne indokolt a lokális horpadási ellenállás meghatározásához:

- S355-ös minőség esetén  $\gamma_{M^*} = 1,16$ ,
- S960-as minőség esetén  $\gamma_{M^*} = 1,07$ ,
- az előzőek alapján, acélminőségtől függetlenül tett esetben  $\gamma_{M^*} = 1,11$ .

A kutatás szervesen kötődik az EN 1993-1-5 szabvány megújítási folyamatához a lemezhorpadási görbe megbízhatósági szintjének kiértékelése révén. Az említett szabvány revíziós folyamata jelenleg zajlik, és a lemezhorpadási görbe, illetve a hozzá tartozó parciális tényező értékének meghatározása napirendi ponton van az Európai Szabványügyi Bizottságban (CEN).

### Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton fejezik ki köszönetüket az Emberi Erőforrások Minisztériumának a számukra nyújtott támogatásért. Jelen kutatás és cikk az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-4-III kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült. A kutatást ezen kívül támogatta az MTA Bolyai János Kutatói Ösztöndíja is, melyért a szerzők szintén köszönetüket fejezik ki.

### Hivatkozások

- [1] EN 1993-1-5. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements. European Committee for Standardization (CEN); 2006.
- [2] N. Schillo, M. Feldmann „Local buckling behaviour of welded box sections made of high-strength steel - Comparing experiments with EC3 and general method” Steel Construction – Design and Research Vol. 8. September 2015, No. 3.
- [3] Schillo N., Taras A., Feldmann M. “Assessment of safety factor for local buckling” WG5 Stuttgart, 26 February 2016
- [4] B. Somodi, B. Kövesdi, Residual stress measurements on welded square box sections using steel grades of S235–S960, Thin-Walled Structures 123: pp. 142-154 (2018).
- [5] N. Schillo, A. Taras, M. Feldmann „Reliability assessment for local buckling of plates” EUROSTEEL 2017, September 13–15, 2017, Copenhagen, Denmark

ISO 9001:2008 - ISO 14001:2004 - EN 1090-1:2009+A1:2011 - EN 1090-2:2008+A1:2011

## NAGÉV RÁCS KFT.

H-4220 Hajdúböszörmény, Kinizsi P. u. 7.

Tel.: +36 52 563 113

Fax.: +36 52 563 178

Mobil :+36 20 477 6315

E-mail: nagev.racs@nagev.hu

www.nagev.hu



# JÁRDARÁCSGYÁRTÁS

JÁRDARÁCSOK

LÉPCSŐFOKOK

VÍZELVEZETŐK

LÁBTÖRLŐ RÁCSOK

ANGOLAKNA RÁCSOK

TÁBLARÁCSOK

ACÉLSZERKEZETEK

KERÍTÉSSZERKEZETEK